Chapitre 1

Systèmes dynamiques pour les sciences cognitives

1.1. Introduction

L'outil commun à tous les chapitres de cet ouvrage est l'utilisation, sous une forme ou sous une autre, du formalisme des systèmes dynamiques, appliqué à la modélisation de processus cognitifs individuels ou collectifs. Nous proposons ici une description des notions de base de la théorie des systèmes dynamiques. Cette revue, loin d'être exhaustive, présente un certain nombre de notions et de termes utiles pour la suite. Nous terminons par un certain nombre de passerelles, classiques ou nouvelles, entre les concepts issus des systèmes dynamiques et les sciences cognitives.

1.2. Systèmes dynamiques

Un système dynamique est un modèle permettant de décrire l'évolution au cours du temps d'un ensemble d'objets en interaction. Cet ensemble d'objets est défini par le modélisateur. Définir un système dynamique nécessite de définir deux catégories de descriptions :

– une *représentation d'état*. Cette représentation décrit ce qui relève du domaine spatial. Il s'agit d'une liste de variables, que l'on appelle vecteur d'état, permettant de décrire à tout instant notre ensemble d'objets. Le nombre de ces variables correspond au nombre de *degrés de liberté* de notre système, en prenant en compte les liaisons mécaniques et les contraintes solides entre les objets ;

Chapitre rédigé par Emmanuel DAUCÉ.

– une *fonction de transition*. Cette fonction décrit ce qui relève du domaine temporel. Elle décrit toutes les forces, contraintes élastiques, collisions, et plus généralement les échanges d'énergie entre les objets. Cette fonction donne ainsi l'évolution du vecteur d'état entre deux instants t_1 et t_2.

Un système dynamique est donc la donnée d'un vecteur d'état et d'une fonction de transition. On peut noter que la définition d'un système dynamique, dans la mesure où elle se réfère à une sous-partie du monde, définit également une frontière entre un « intérieur » et un « extérieur » au système. Cet extérieur est constitué par l'ensemble des objets non décrits par le modèle, que l'on appelle *environnement* du système. On attend classiquement de la part de l'environnement un comportement stationnaire (source chaude, source froide, stimulation périodique, source de bruit, etc.) [1]. Si l'action de l'environnement sur le système ne dépend pas du temps, le système est dit *autonome* [2] (et dans le cas contraire le système est dit *forcé*). Un système qui consomme de l'énergie (ou toute autre grandeur assimilable à une énergie) au cours du temps est dit *dissipatif*.

1.2.1. *Propriétés générales et définitions*

Un système dynamique est défini par un triplet $D = (X, T, \phi)$, constitué de l'espace d'états X, du domaine temporel T et d'une fonction de transition d'état $\phi : X \times T \to X$, qui possède la propriété, pour tout $\mathbf{x} \in X$ et $t_1, t_2 \in T$:

$$\begin{cases} \phi(\mathbf{x}, 0) = x \\ \phi\big(\phi(\mathbf{x}, t_1), t_2\big) = \phi(\mathbf{x}, t_1 + t_2) \end{cases} \qquad [1.1]$$

A partir d'un vecteur de *conditions initiales* $\mathbf{x}_0$, la fonction ϕ permet de définir l'état du système à tout instant. Plus précisément, pour tout $\mathbf{x}_0 \in X$, la *trajectoire* qui a $\mathbf{x}_0$ pour origine est définie par l'application $\phi_{\mathbf{x}_0} : T \to X$ telle que

1. A ce stade, le terme « environnement » se réfère à une source de valeurs parfaitement indépendantes du système lui-même. Nous verrons plus loin que le terme « environnement » peut également se référer à une source de stimuli agissant sur un agent (vu comme un système dynamique), mais également soumise aux actions de l'agent. Dans ce cas, la source de stimuli n'est plus indépendante de l'agent et il est nécessaire d'étendre le système à l'ensemble agent + environnement.

2. L'autonomie d'un système vivant (ou social) est classiquement définie comme la propriété du système à évoluer selon une loi propre, à s'autodéterminer. Cette définition entre en concurrence avec la définition stricte de l'autonomie que nous donnons ici. Dans la suite de l'ouvrage, l'une ou l'autre des significations pourra être utilisée, selon le contexte. Ainsi, on parlera fréquemment de « robotique autonome », en faisant référence à la capacité du robot à construire ses propres règles, *en interaction avec un environnement*.

$\phi_{\mathbf{x}_0}(t) = \phi(\mathbf{x}_0, t)$. Une trajectoire associe donc à chaque instant un point dans l'espace d'états ; l'ensemble de ces points constitue une courbe appelée *orbite* de $\mathbf{x}_0$. Le terme *trajectoire* évoque le déplacement d'un mobile au sein d'un espace tridimensionnel. Bien entendu, les variables d'état peuvent représenter bien autre chose que des coordonnées spatiales, mais l'évolution de notre système peut toujours être décrite par une courbe au sein de son espace d'états (également appelé *espace des phases*). Cette courbe fournit une représentation abstraite de l'évolution du système.

1.2.2. *Espace temporel*

Le choix de l'espace temporel T est décisif et dépend en général du phénomène que l'on souhaite modéliser. On distingue deux grandes catégories de systèmes dynamiques : les systèmes à temps continu et les systèmes à temps discret. Si $T = \mathbb{R}^+$, le système est dit à *temps continu*, et si $T = \mathbb{N}$, le système est dit à *temps discret* :

– les systèmes à temps continu sont les systèmes différentiels classiques, qui servent par exemple à décrire les systèmes physiques en mécanique ou en électricité. Une équation différentielle de type :

$$\frac{\mathrm{d}\mathbf{x}(t)}{\mathrm{d}t} = h\big(\mathbf{x}(t)\big), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x}(t) \in X \subset \mathbb{R}^N \qquad [1.2]$$

permet de définir un système dynamique autonome [3] à temps continu $D = (X, \mathbb{R}^+, \phi)$ où ϕ est la solution de [1.2] :

$$\phi(\mathbf{x}_0, t) = \phi(\mathbf{x}_0, 0) + \int_0^t h\big(\mathbf{x}(s)\big)\,\mathrm{d}s, \quad \phi(\mathbf{x}_0, 0) = \mathbf{x}_0 \qquad [1.3]$$

– le formalisme des systèmes à temps discret est utile, entre autres, pour décrire le comportement des systèmes de traitement de l'information comme certains réseaux de neurones. Les systèmes à temps discret autonomes reposent sur l'itération d'une fonction $f : X \to X$, telle que :

$$\mathbf{x}(t+1) = f\big(\mathbf{x}(t)\big), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0, \quad \mathbf{x}(t) \in X \subset \mathbb{R}^N \qquad [1.4]$$

qui définit le système dynamique $D = (X, \mathbb{N}, \phi)$ où ϕ est donné par :

$$\phi(\mathbf{x}_0, t) = f^t(\mathbf{x}_0) \qquad [1.5]$$

Le temps des systèmes à temps discret peut être vu comme étant associé à des mesures effectuées sur un système à temps continu dont on observe l'évolution à intervalles réguliers. Par ailleurs, les systèmes à temps continu n'étant pas toujours

3. Un système non autonome sera défini par une fonction de transition dépendant du temps, soit $\frac{\mathrm{d}\mathbf{x}(t)}{\mathrm{d}t} = h(\mathbf{x}(t), t)$.

intégrables, il est fréquemment fait appel à des simulations numériques pour décrire leur comportement. Dans ce cas, le calcul numérique nécessite une discrétisation du système continu [4].

Dans les domaines discret ou continu, les fonctions f ou h sont également appelées fonctions de transition.

1.2.3. *Attracteurs*

Une fois le système dynamique défini, il est possible, au-delà de l'intégration de trajectoires particulières, de considérer un certain nombre de propriétés globales. On peut ainsi considérer le champ de vecteurs qui, à chaque point de l'espace, associe sa vitesse. A l'instant t, on définit le *flot* du système par l'application $\phi_t : X \to X$ telle que $\phi_t(x) = \phi(x, t)$. Le flot nous donne ainsi un « instantané » du comportement du système sur tout l'espace. On peut noter que pour les systèmes à temps discret, on a $\phi_t = f$. Si la fonction de transition ne dépend pas du temps (système autonome), le flot est le même à tout instant.

Au sein d'un système dissipatif [5], il est parfois possible de définir une ou plusieurs applications $H(\mathbf{x})$, définies sur tout l'espace, appelées *fonctions de Lyapunov* [6]. Ces fonctions ont pour propriété d'être strictement décroissantes sur toute trajectoire. Une fonction de Lyapunov est un analogue de l'énergie dans les systèmes physiques. On appelle le champ défini par cette fonction un *champ de potentiel*. Une trajectoire du système consiste à suivre la ligne de plus grande pente jusqu'à atteindre un minimum d'énergie (comme une bille roulant vers le fond d'une vallée). Le point correspondant à ce minimum d'énergie est appelé *attracteur,* qui dans ce cas particulier est un *point fixe*. La dynamique qui mène des conditions initiales à l'attracteur est appelée *dynamique transitoire,* par opposition au comportement permanent obtenu lorsque l'attracteur est atteint. Le système dynamique tend (au bout d'un certain temps) à se figer. Les systèmes pour lesquels on ne sait pas définir une fonction de Lyapunov peuvent présenter des attracteurs plus complexes que de simples points fixes. Il existe par exemple de nombreux systèmes naturels qui présentent des comportements oscillatoires qui se maintiennent sur de longues durées (évoquons simplement les battements de cœur ou la respiration dans les systèmes vivants). Lorsque, après des transitoires, un système

4. La discrétisation la plus élémentaire est obtenue avec le premier terme du développement de Taylor (schéma d'intégration d'Euler) : $\mathbf{x}(t + \Delta t) \simeq \mathbf{x}(t) + h(\mathbf{x}(t))\Delta t$, ce qui donne un système discret décrit par l'application $f(x) = x + h(x)\Delta t$.

5. Système qui « dépense de l'énergie » au cours du temps. Les systèmes dynamiques que nous considérons dans cet ouvrage sont des systèmes dissipatifs.

6. Dans le cas d'un système à une seule variable réelle $\mathrm{d}x/\mathrm{d}t = h(x)$, on peut définir $H(x) = -\int h(x)\,\mathrm{d}x$.

maintient une dynamique oscillatoire pour une durée indéfinie, on dit qu'il a atteint un *cycle limite*. Il existe des structures d'attracteurs plus complexes, de type fractale, auquel cas on parle d'*attracteur étrange* (voir paragraphe suivant).

Si plusieurs attracteurs existent au sein de l'espace d'états, chaque attracteur a son propre « bassin d'attraction », qui est un ensemble de conditions initiales qui conduisent la trajectoire vers cet attracteur. Les variétés qui marquent la frontière entre deux bassins sont les *séparatrices*.

1.2.4. *Le chaos déterministe*

La notion de chaos déterministe, qui trouve ses fondements dans l'article de Lorenz (Lorenz, 1963), a connu un développement mathématique dans les années 1970 (Ruelle et Takens, 1971) suivi d'un véritable essor scientifique et populaire dans les années 1980. Le chaos marque un profond bouleversement dans la manière d'envisager les systèmes dynamiques. Le développement de l'informatique n'est pas étranger au succès rencontré, de par la facilité des simulations et la beauté de certains résultats obtenus.

On dit qu'un système dynamique est chaotique s'il présente la propriété de *sensibilité aux conditions initiales* (SCI). La propriété de SCI se traduit par le fait que la distance entre deux trajectoires tend à augmenter de manière exponentielle au cours du temps, pouvant atteindre une distance limite qui est de l'ordre du diamètre de l'attracteur (au-delà d'un certain horizon temporel, le repliement des trajectoires imposé par le caractère borné de l'espace d'états stoppe la divergence exponentielle). Géométriquement, l'attracteur peut être décrit comme le résultat d'une opération d'étirement et de repliement d'un cycle de l'espace des phases, répétée un nombre infini de fois. La « longueur » de l'attracteur est infinie, bien qu'il soit contenu dans un espace fini. Toute condition initiale appartenant au bassin d'attraction produit une trajectoire qui tend à parcourir de façon spécifique et unique cet attracteur. Le système est contraint à évoluer de manière « imprévisible » dans une région bien définie de l'espace des phases.

Dans le cas où le système dynamique vise à modéliser un phénomène physique, la propriété de SCI montre la difficulté à prédire le comportement de ce phénomène. En effet, toute mesure effectuée sur une grandeur physique contient un bruit de mesure qui fait que la trajectoire du système modélisé et celle du système réel divergeront au bout d'un temps fini. Aussi précise que soit la modélisation, il est impossible de prédire le comportement du système réel à long terme. On peut ajouter que l'observateur, en effectuant sa mesure, influence nécessairement le système qu'il souhaite modéliser et modifie donc sa trajectoire : on retrouve un paradoxe du type quantique, mais pour des phénomènes macroscopiques.

Il est intéressant de noter que le chaos déterministe apparaît sur des systèmes à petit nombre de variables d'état[7]. Une condition nécessaire à l'apparition du chaos est que le système soit *non linéaire*. C'est la complexité des dynamiques produites par des systèmes dont la définition tient en quelques lignes qui a, dans un premier temps, étonné les chercheurs et suscité l'essentiel des travaux entrepris sur la question. Pour des systèmes dont le nombre de variables d'état est élevé, l'étude s'est développée plus tardivement.

Un système dynamique possède en général un ou plusieurs paramètres dits « de contrôle », qui agissent sur les caractéristiques de la fonction de transition. Selon la valeur du paramètre de contrôle, les mêmes conditions initiales mènent à des trajectoires correspondant à des régimes dynamiques qualitativement différents (on parle également de *transition de phase*). La modification continue du paramètre de contrôle peut conduire à une modification de la nature des régimes dynamiques développés dans le système. Il existe plusieurs scénarios qui décrivent le passage du point fixe au chaos. On constate dans tous les cas que l'évolution du point fixe vers le chaos n'est pas progressive, mais marquée par des changements discontinus appelés *bifurcations*. Une bifurcation marque le passage soudain d'un régime dynamique à un autre, qualitativement différent. On parle également, lors d'une telle transition, d'une perte de stabilité structurelle. La route vers le chaos par quasi-périodicité, dite à la Ruelle et Takens (1971), est un des scénarios génériques marquant le passage du point fixe au chaos. Elle met en jeu une série de bifurcations menant à des dynamiques de plus en plus complexes. A chaque bifurcation, un nouveau mode se superpose à celui qui est déjà en place, menant d'un cycle limite à un « tore » (deux fréquences superposées), puis enfin au chaos suite à un « accrochage de fréquence » (Arnold, 1978). Il existe d'autres scénarios, comme par exemple la route vers le chaos par doublement de période et les intermittences (Bergé, Pomeau et Vidal, 1988).

Les systèmes chaotiques se distinguent des systèmes purement stochastiques par le fait qu'ils présentent certaines régularités et n'explorent – hors transitoires – qu'une faible part de leur espace d'états. La structure fractale de l'attracteur manifeste, en dépit de sa complexité, une forme d'organisation. Une des propriétés les plus remarquables des systèmes chaotiques est leur capacité à adapter leur trajectoire en fonction des perturbations ou stimulations extérieures. Dans le domaine de la biologie particulièrement, il semble prouvé que la dynamique chaotique de certains organes, tels le cœur, leur assure une bonne adaptabilité à une brusque sollicitation. Pour ce qui concerne le cerveau, par analogie, une dynamique de nature chaotique serait propice à une adaptabilité dynamique rapide aux changements intervenant sur les entrées sensorielles (voir aussi le chapitre 2 sur la question).

7. Au moins trois variables d'état pour les systèmes à temps continu, comme le système de Lorenz par exemple, et une seule pour les systèmes à temps discret, comme la fonction logistique.

Il y a néanmoins un contresens à éviter lorsque l'on utilise la notion de chaos dans l'étude de systèmes complexes tels que le cerveau. On a vu en effet que des dynamiques chaotiques d'aspect complexe pouvaient être produites par des systèmes intrinsèquement simples. Le cerveau est, quant à lui, un système intrinsèquement complexe. La question de la transposition sur ce type de systèmes de notions issues de l'étude de systèmes à nombre très restreint de degrés de liberté pose question. Par ailleurs, même s'il apparaît probable que le chaos intervient au sein de l'activité cérébrale, il n'en explique pas pour autant la complexité de la cognition elle-même. Néanmoins, cette intervention probable du chaos dans la cognition naturelle justifie qu'on le prenne en compte dans la modélisation de processus cognitifs.

1.3. Systèmes dynamiques et sciences cognitives

L'étude des systèmes dynamiques est initialement dédiée à la physique et a, pour ces raisons, comme domaines d'application initiaux la description de solides en mouvement (mécanique céleste), d'oscillateurs électriques ou chimiques, d'ensembles de particules, etc. Ce n'est néanmoins pas la première fois que des notions « physiques » essaiment dans le champ des sciences sociales et de la psychologie. La notion de champ (champ électrique, champ de gravitation...) et d'équilibration a par exemple fortement influencé l'école de la Gestalt en psychologie de la perception au début du XX^{e} siècle. La même notion d'équilibration (homéostasie) est à la base de la cybernétique des années 1940, qui sert de fondement à la théorie moderne du contrôle[8]. Absente des sciences cognitives dans les années 1960-1970, la physique est revenue en force au début des années 1980 avec la description du modèle de réseau de neurones de Hopfield (1982) et son équivalence formelle avec des ensembles de particules en interaction : les « verres de spin » (modèle d'Ising). Les apports de la physique statistique sont plus que jamais à l'ordre du jour en sciences cognitives à l'heure actuelle, pour la description des grands ensembles de neurones, les « réseaux d'automates », le « recuit simulé », etc.

Notre approche consiste ici à reprendre et exploiter des notions issues de la physique des systèmes déterministes. Nous cherchons à éclairer certains concepts élémentaires des sciences cognitives (« autonomie », « émergence », « représentation », « intentionnalité », etc.) à l'aide des outils et concepts présentés dans la section précédente (trajectoire, attracteur, champ de potentiel, résonance, etc.).

Une notion, fédératrice dans le champ des sciences cognitives, revient souvent dans la suite de cet ouvrage : la notion d'« agent ». Un agent est primitivement « ce qui agit » (on parle par exemple d'agent infectieux). Dans notre champ, la notion correspond à une entité agissant *intentionnellement*, c'est-à-dire conformément à certains

8. D'ailleurs, le projet cybernétique visait à naturaliser les processus psychiques avec pour fondements les seules lois de la physique (Dupuy, 1999).

buts propres (ceci inclut par exemple tous les êtres vivants, mais exclut des entités mobiles telles que les météorites ou les planètes qui agissent « à l'aveuglette »). On appelle par extension agent un robot mobile ou une entité logicielle que l'on *souhaiterait* voir agir en fonction de buts propres, à la manière d'un humain ou même simplement d'un petit animal, comme cela a été dit dans l'introduction. On prête donc à l'agent d'avoir un corps biologique, mécanique ou « logiciel ». Des capteurs ou senseurs lui fournissent une information sur son environnement et des actionneurs lui permettent d'agir sur ce même environnement.

On peut distinguer deux points de vue (ou méthodes) dans la manière d'utiliser les systèmes dynamiques pour modéliser des agents cognitifs : un point de vue « interne » et un point de vue « externe ».

1.3.1. *Point de vue interne : modélisation d'un agent*

Adopter le point de vue interne consiste à se mettre, en tant que modélisateur, « dans la peau » de l'agent[9]. L'environnement est vu comme une source de signaux, d'informations. Il n'est pas modélisé en tant que tel[10]. Dans ce cadre, une analogie formelle est faite entre le corps d'un agent et un système dynamique. La peau et les organes sensoriels constituent la « frontière » entre l'intérieur et l'extérieur, le métabolisme est assimilé aux états internes, les sens fournissent un signal qui vient « forcer » le système, etc. Cette approche permet de mettre en avant la notion de *déterminisme interne* et de *clôture opérationnelle*, cruciale pour la compréhension des processus cognitifs (Varela, Thomson et Rosch, 1993). En effet, voir l'agent comme un système dynamique, c'est donner la primauté à la « loi interne », c'est considérer les signaux comme étant des perturbations de la dynamique interne et les actions comme étant des déformations du corps de l'agent. Ce point de vue nous éloigne donc autant que possible d'un agent « réactif », c'est-à-dire dont les actions sont déterminées par une commande imposée de l'extérieur. Considérer un agent comme un système agissant essentiellement selon une loi interne nous donne une prémisse de ce que peut être une action orientée par un but propre.

Cette description formelle d'un agent en tant que système dynamique forcé masque cependant la difficulté qu'il y a à décrire effectivement le système dynamique qui modélise l'agent. La complexité et le nombre de degrés de liberté du corps d'un agent sont en effet sans commune mesure avec ceux des systèmes physiques. Même si formellement nous voyons l'agent comme un système dynamique, il est difficile de

9. Selon cette approche, que l'on peut qualifier de phénoménologique, on met l'environnement « entre parenthèses ».

10. Soit il s'agit de l'environnement réel pour un agent robotique, soit il s'agit d'un modèle d'environnement simulé informatiquement, qui sert de source de signaux venant « frapper » l'agent.

produire *ex nihilo* un modèle d'agent un tant soit peu évolué sous la forme d'un jeu d'équations non linéaires couplées... La démarche de modélisation va donc consister à faire le choix d'un système dynamique générique, *a priori* à grand nombre de degrés de liberté, relié à son environnement par des capteurs, sans que l'on fasse d'hypothèse précise sur le type de connaissances que véhiculent ces capteurs, et par des actionneurs qui produisent des mouvements sur l'environnement sans que l'agent en « connaisse » le mode d'emploi. Par analogie avec le déterminisme génétique des systèmes biologiques, il peut exister dès la conception des voies réflexes, automatiques, conduisant à des actions prédéterminées et assurant des chances de survie minimales ; mais l'agent, en tant que système dynamique, n'a pas de connaissance *a priori* sur son environnement. Un tel agent possède bien une loi interne, mais celle-ci est « sans but ». C'est dans ce cadre qu'interviennent des processus *adaptatifs* capables de modifier et façonner le système de manière à le rendre viable, compatible, avec son environnement. C'est à l'aide de ces processus, dont un certain nombre seront décrits dans cet ouvrage, que la loi interne, « non orientée », devient progressivement orientée vers la résolution de tâches en accord avec les besoins de l'agent. Du fait de nos limites en tant que concepteur, nous devons faire confiance à un tel processus au cours duquel l'agent « puise » dans son environnement des éléments de connaissance qui le structurent. La structure ne vient donc pas du concepteur : elle vient de l'environnement. On voit au passage que :

– parler d'un processus d'adaptation, c'est décrire une deuxième dynamique qui se superpose à la dynamique initiale. La dynamique adaptative est une dynamique « lente » par rapport à la dynamique propre du système. C'est une dynamique qui fait évoluer doucement les paramètres du système. Cette dynamique n'implique pas seulement l'agent mais également son environnement : les stimuli de l'environnement s'impriment sur l'agent, entrent progressivement dans la « composition » de l'agent ;

– modifier les paramètres du système peut également signifier modifier la nature du régime dynamique interne. On peut ainsi observer dans des systèmes artificiels (Daucé, Quoy, Cessac, Doyon et Samuelides, 1998) ou naturels bien connus (Skarda et Freeman, 1987) des transitions de phase qui sont caractéristiques d'un processus d'apprentissage en cours.

1.3.2. *Point de vue externe : modélisation de l'agent et de l'environnement*

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la dynamique interne d'un agent est influencée par son environnement et que la loi interne de l'agent est façonnée par son environnement. Le revers de la médaille est que, réciproquement, l'environnement est façonné par l'agent. Lorsque l'on a une telle situation de codépendance, on dit que l'agent et l'environnement sont dans un rapport dynamique, autrement dit que l'on peut modéliser l'ensemble agent + environnement comme un seul système dynamique. Cette codépendance conduit à une coévolution de l'agent et de son environnement au

cours du processus d'interaction (l'agent individuellement ou l'environnement individuellement n'évoluerait pas de la même manière sans ce couplage).

La présentation, même sommaire, des systèmes dynamiques, dans la section précédente, a montré qu'au sein d'un système non linéaire, de petits facteurs peuvent avoir de grandes conséquences. Ainsi, modéliser un même agent dans un environnement indépendant (au sein duquel, par exemple, les ressources sont en quantité infinie) ou dans un environnement codépendant (au sein duquel l'évolution des ressources est sujette à une loi propre) ne conduira pas, à terme, aux mêmes stratégies de survie. De même, mettre un prédateur en présence de proies aux stratégies figées ou de proies aux stratégies évolutives ne conduit pas, à terme, aux mêmes comportements de chasse. Ainsi, une bonne analyse d'un processus cognitif en cours chez un agent (lors d'une interaction sociale, un affrontement, un dialogue) nécessite de « prendre du large », d'élargir le champ et de ne pas séparer les processus psychiques individuels du processus d'interaction global, autrement dit de considérer un seul processus englobant plutôt que de considérer plusieurs processus individuels. On pourra dans certains cas parler d'un « attracteur comportemental » qui met en jeu plusieurs agents dans la résolution d'une tâche collective.

Cette extension de l'approche dynamique à une société d'agents pose bien sûr quelques difficultés. Le problème essentiel est que le système global est fortement hétérogène ; le système global est composé d'« îlots », les agents, au sein desquels les variables d'état sont fortement couplées, et d'un ensemble de couplages faibles entre ces agents coévoluants. Le système global a un nombre de degrés de liberté très important qui décourage l'analyse. Néanmoins, l'observation des comportements des sociétés d'agents naturels ou artificiels montre que dans certaines situations, le système global est drastiquement simple, peut être décrit par quelques équations, comme si les agents « renonçaient à leur liberté » pour adopter des comportements plus élémentaires. Chacun connaît l'exemple des lucioles ou des cigales capables d'osciller de concert, les chaînes de fourmis, le vol des oiseaux migrateurs... L'exemple le plus simple d'une réduction apparente du nombre de degrés de liberté est donné par Huygens : lorsque deux horloges à balancier sont dans une même pièce, elles finissent par battre de façon synchronisée. Autrement dit, le système à quatre degrés de liberté (pour chaque pendule : l'angle et la vitesse angulaire), formé par les deux pendules, tend à former un système à deux degrés de liberté. On parle dans ce cas de *résonance* entre les deux pendules. Pour revenir aux sociétés d'agents, « entrer en résonance » reviendrait à synchroniser les actions individuelles conformément à la tâche commune en cours. Cela ne signifie pas que les agents font tous la même chose, mais, qu'à leur poste donné, ils accomplissent une tâche élémentaire, un peu comme des ouvriers sur une chaîne de montage. On se retrouve dans une situation où les couplages entre les agents sont forts et où les potentialités dynamiques internes aux agents sont en quelque sorte inhibées. Le nombre de degrés de libertés *apparent* du système est beaucoup plus faible que ce qu'il devrait être. Lorsque les agents renoncent, provisoirement, à leur

autonomie pour adopter un comportement d'ensemble, on parle de *couplage des dynamiques* entre les agents. Ainsi, pour analyser ou modéliser une situation d'interaction complexe, on est autorisé à fonder l'analyse sur la dynamique de la tâche elle-même, sans prendre en compte dans le détail tous les aspects de la dynamique propre des agents. Lorsque la tâche contraint ainsi les agents, on dit que le global agit sur le local.

1.4. Conclusion

Pour terminer, disons que l'approche dynamique s'oppose à l'approche fonctionnaliste qui fait reposer la conception des agents/robots sur une décomposition du système global en sous-fonctions. L'approche fonctionnaliste est dite « descendante[11] », parce que le concepteur détermine d'abord la fonction globale, puis « descend en complexité » en la décomposant en sous-fonctions élémentaires. Cette approche présente quelques difficultés lorsqu'il s'agit de « remonter la machine ». Les concepteurs de robots connaissent bien la difficulté qu'il y a à intégrer différents blocs fonctionnels au sein de leurs architectures de contrôle : bloc de vision, bloc de proprioception, bloc moteur, mémoire, etc. L'ensemble se comporte rarement comme on l'avait prédit au début ! Cela signifie qu'un concepteur d'agent qui néglige, pour concevoir son agent, de prendre en compte à la fois la façon dont les différentes fonctions interagissent au sein de la dynamique interne de l'agent et la manière dont l'agent et son environnement « travaillent ensemble », risque de négliger un ensemble important de facteurs, qui peuvent être cruciaux pour le bon fonctionnement de l'agent au sein de son environnement. L'approche « ascendante[12] » prend ce problème à contre-pied en définissant un système de contrôle global, générique, composé de sous-entités non spécifiques (qui peuvent être les « neurones » d'un réseau de neurones). La mise en place d'un processus d'adaptation local induit des modifications entre les composants élémentaires, dont les effets « remontent » jusqu'à modifier la dynamique globale et donc la nature des actions produites par l'agent sur son environnement.

Enfin, l'étude des systèmes chaotiques nous a montré que le comportement d'un système semble parfois ne pas être déterminé seulement par sa simple description analytique. Au sein d'un système chaotique, la trajectoire semble ainsi pouvoir prendre quelques libertés, « choisir » son chemin sur l'attracteur. De même, l'observation de deux agents coévoluants semble laisser planer le doute sur « qui choisit » la trajectoire évolutive prise : est-ce l'un ou l'autre des agents individuellement, est-ce le processus qui englobe les deux agents ? Plus généralement, les trajectoires adoptées par un système complexe semblent parfois obéir à un déterminisme propre, sur lequel le

11. *Top-down* en anglais.
12. *Bottom-up* en anglais.

concepteur a peu de prise. On parle d'« émergence » lorsqu'un système fait apparaître de nouveaux processus, une nouvelle organisation, qui n'étaient pas *a priori* prévus par le concepteur. Même si une ambiguïté demeure sur le statut épistémologique de cette émergence [13], celle-ci est souvent vue comme une source de création de comportements nouveaux, précieuse dans cette discipline qui cherche à faire sortir les structures cognitives de l'interaction avec l'environnement.

1.5. Bibliographie

Arnold, V. (1978). *Chapitre supplémentaire sur la théorie des équations différentielles ordinaires*. Moscou : Mir.

Bergé, P., Pomeau, Y., & Vidal, C. (1988). *L'ordre dans le chaos*. Paris : Hermann.

Daucé, E., Quoy, M., Cessac, B., Doyon, B., & Samuelides, M. (1998). Self-organization and dynamics reduction in recurrent networks: Stimulus presentation and learning. *Neural Networks, 11*, 521-533.

Dupuy, J.-P. (1999). *Aux origines des sciences cognitives*. Paris : La Découverte.

Hopfield, J.J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proceedings of the National Academy of Science, 79*, 2554-2558.

Lorenz, E.N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *Journal of Atmospheric Sciences, 20*, 130-141.

Ruelle, D., & Takens, F. (1971). On the nature of turbulence. *Communications in Mathematical Physics, 20*, 167-192.

Skarda, C.A., & Freeman, W.J. (1987). How brains make chaos in order to make sense of the world. *Behavior Brain Sciences, 10*, 161-195.

Varela, F.J., Thomson, E., & Rosch, E. (1993). *L'inscription corporelle de l'esprit*. Paris : Le Seuil.

13. L'impression de nouveauté tient-elle d'un défaut d'analyse du concepteur ou y a-t-il apparition d'une entité radicalement nouvelle créée sur place ?